BSJ
BURAPHA SCIENCE JOURNAL
ISSN 2985-0983 (online)
วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ 30 (ฉบับที่ 1) มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2568
BURAPHA SCIENCE JOURNAL Volume 30 (No.1) January – April 2025
บทความวิจัย

คุณภาพของน้ำผัก/ผลไม้รวมจากของเหลือในการตัดแต่งผักสลัดภายใต้กระบวนการแปรรูปโดยความดันสูง

Qualities of Mixed Vegetables/Fruit Juice from Fresh-Cut Salad Waste under High-Pressure Processing

นัฐวงค์ เฟื่องไพบูลย์*, วัฒนา สุขบิดา, ปาริชาติ งามแพง และ รัชฎา ตั้งวงค์ไชย

Nattavong Fuangpaiboon*, Wattana Sukbida, Parichart Ngampang and Ratchada Tangwongchai

สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประเทศไทย

Department of Food Technology, Faculty of Technology, Khon Kaen University, Thailand

Received : 29 January 2025, Received in revised form : 7 February 2025, Accepted : 10 February 2025

Available online : 20 February 2025

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์และที่มา : เทคโนโลยีการแปรรูปอาหารด้วยความดันสูงเป็นการแปรรูปแบบไม่ใช้ความร้อนซึ่งเป็นนวัตกรรมการแปรรูปอาหารที่สามารถยับยั้งจุลินทรีย์และเอนไซม์ โดยยังคงรักษาคุณค่าทางโภชนาการ สารให้กลิ่นรส และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพไว้ได้ การแปรรูปโดยความดันสูงประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร เช่น น้ำผลไม้ แยม และผลิตภัณฑ์ผลไม้อื่น ๆ ข้อดีของการแปรรูปโดยความดันสูงสามารถกำจัดการใช้ความร้อนซึ่งลดการทำลายองค์ประกอบของอาหารได้ นอกจากนี้ผักผลไม้ส่วนคัดทิ้งที่เหลือจากการตัดแต่งมีจำนวนมากซึ่งไม่สามารถขายได้เนื่องจากลักษณะที่ไม่น่ารับประทาน แต่ยังคงคุณค่าในด้านสารอาหารและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น สารต้านอนุมูลอิสระ เป็นต้น ไม่แตกต่างจากผักสลัดสด จึงจำเป็นต้องมีการแปรรูปเพื่อเปลี่ยนรูปลักษณ์ดังกล่าวแต่ยังคงรักษาคุณค่าของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพไว้ให้มากที่สุด การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการแปรรูปด้วยความดันสูงที่ระดับของความดันและเวลาต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เคมีและจุลชีววิทยาของน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้รวม

วิธีดำเนินการวิจัย : นำผักกรีนโอ๊ค ผักเรดโอ๊ค และผักมินิคอสที่เหลือทิ้งจากกระบวนการตัดแต่งผักสลัดในสัดส่วน 45:45:10 โดยน้ำหนัก และผลไม้ ได้แก่ องุ่นแดง แอปเปิ้ลแดง และมะนาว มาสกัดด้วยเครื่องสกัดแบบเย็นและผสมในสัดส่วนของน้ำผักสลัดผสม น้ำองุ่นแดง น้ำแอปเปิ้ลและน้ำมะนาวที่ 59.58:23.57:14.85:2 โดยน้ำหนัก บรรจุน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้รวมปริมาณ 150 มิลลิลิตรในขวดพลาสติก จากนั้นนำน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้รวมไปแปรรูปด้วยความดันสูงที่ระดับความดัน 300, 400, และ 500 MPa นาน 3, 6 และ 9 นาที วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ ได้แก่ ค่าสี ค่าความขุ่น ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ ค่าความเป็นกรดด่าง สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสะด้วยวิธี DPPH และ FRAP ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดและปริมาณยีสต์และรา

ผลการวิจัย : ความดันและเวลามีอิทธิพลร่วมอย่างมีนัยสำคัญต่อความเป็นสีแดง (a*) และปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้ระดับความดันยังมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสว่าง (L*) ความเป็นสีแดง (a*) ความเป็นสีเหลือง (b*) ความเป็นกรด-ด่าง และกิจกรรมของสารต้านอนุมูลอิสระที่วัดโดยวิธี FRAP ($p \leq 0.05$) การใช้ความดันที่ 500 MPa นาน 9 นาที ส่งผลต่อค่าความเป็นสีแดงมากขึ้น ($a^* = -0.50$, $p \leq 0.05$) ในขณะที่ความดันและเวลาไม่มีผลต่อค่าความขุ่นและปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในตัวอย่างน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้รวม ($p > 0.05$) การเพิ่มระดับความดันมีความสัมพันธ์กับการลดลงของกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ FRAP ($p \leq 0.05$) การใช้ความดันที่ 500 MPa นาน 3-9 นาที ในน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้รวม พบว่ามีค่ากิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ FRAP ในช่วง 7.45-7.93 µg TE/100 กรัมตัวอย่าง ในขณะที่ระดับความดัน เวลา และอิทธิพลร่วมระหว่างความดันและเวลาไม่มีอิทธิพลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ($p > 0.05$) ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ของน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้รวมมีค่าในช่วง 35.94-41.21 µg GAE/100 กรัมตัวอย่าง และ 4.26-4.56 µg TE/100 กรัมตัวอย่างตามลำดับ ส่วนระยะเวลาในการแปรรูปมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความสว่างและความเป็นกรดด่าง ($p \leq 0.05$) น้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้รวมที่ผ่านความดัน 300 MPa นาน 3-6 นาที มีค่าความเป็นกรดด่าง ในช่วง 3.83-3.84 เมื่อระดับความดันและเวลาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดลดลง ($p \leq 0.05$) ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของตัวอย่างน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้รวมที่ผ่านความดันสูงที่ระดับมากกว่า 300 MPa นาน 3-9 นาทีมีค่าในช่วง 3.33-6.00 CFU/ml. ความดัน เวลา และอันตรกิริยาระหว่างทั้งสองปัจจัยจะไม่มีผลกระทบต่อปริมาณยีสต์และราในตัวอย่างน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้รวม ($p > 0.05$) แต่พบว่าปริมาณยีสต์และราลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านความดันสูง อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่ผ่านการแปรรูปทั้งหมดมีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์และราต่ำกว่าเกณฑ์ทั่วไปและขอบเขตที่กำหนดสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นกรด ($pH \leq 4.64$) ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยความดันสูง ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับแนวทางของสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาของไทยปี พ.ศ. 2562 (Food and Drug Administration, 2019) ซึ่งแนะนำให้ใช้ความดันอย่างน้อย 400 MPa เป็นเวลา 1-20 นาที สำหรับผลิตภัณฑ์ประเภทนี้

สรุปผลการวิจัย : การแปรรูปน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้รวมด้วยความดันสูงที่ 400 MPa เป็นเวลา 6 นาที เป็นวิธีการแปรรูปแบบไม่ใช้ความร้อนที่มีศักยภาพสูงสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งสภาวะนี้สามารถรักษาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด กิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ FRAP ในตัวอย่างน้ำน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้รวมไว้ได้มาก ปริมาณจุลินทรีย์เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานด้วยต้นทุนที่เหมาะสม วิธีการนี้ไม่เพียงแต่รับประกันความปลอดภัยทางจุลชีววิทยาและคุณภาพเท่านั้น แต่ยังนำเสนอโอกาสในการเพิ่มมูลค่าให้กับผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมผักและผลไม้ตัดแต่งพร้อมบริโภคหรือผักที่ไม่ได้มาตรฐาน โดยแปรรูปให้เป็นเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพที่มีคุณค่าทางโภชนาการ

คำสำคัญ : เทคโนโลยีความดันสูง ; การแปรรูปแบบไม่ใช้ความร้อน ; น้ำผักและผลไม้รวม ; คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมี ; จุลชีววิทยา

Abstract

Background and Objectives : High pressure processing (HPP) is a non-thermal food processing technology that has emerged as innovative methods capable of microbial inactivation and enzyme inhibition while preserving nutritional value, flavor compounds, and bioactive substances. HHP is a favorable application in food industry including juices, jams, and other fruit products. The core benefits of HHP processing are the reduction or significant elimination of heating, avoiding the degradation of the food component from heat. In addition, there is a large amount of fresh-cut salad waste after the cutting process that cannot be sold due to their unappetizing characteristics but have nutrition values and bioactive substances such as antioxidants, etc., with no difference from fresh salad vegetables. Therefore, food processing is required to change this appearance from food waste to juice but still preserve the nutrient value of the bioactive compounds as much as possible. This study aimed to investigate the effects of high-pressure processing (HPP) at various levels of pressure and time on the physical properties, chemical properties, and microbials of a mixed vegetable and fruit juice product.

Methodology : Three types of vegetables (such as Green oak vegetables, red oak vegetables, and mini cos lettuce) from fresh-cut salad waste) and fruits, including red grapes, red apples, and lemons, were extracted using a cold press processor and then mixed. The proportion of mixed vegetables (Green oak vegetables, red oak vegetables, and mini cos lettuce in the proportion 45:45:10 % by weight, respective), red grapes, red apples, and lemons were 59.58, 23.57, 14.85 and 2 % by weight, respectively. Mixed vegetables and fruit juice were packed in polyethylene terephthalate bottle (PET) for 150 ml. Then, mixed vegetables/fruit juice were examined as pressure levels of 300, 400, and 500 MPa applied for durations of 3, 6, and 9 minutes. All Mixed vegetables and fruit juice samples were physical, chemical and microbiology analyzed such as color, turbidity, total soluble solids content, pH value, total phenolic contents, antioxidant activity by DPPH and FRAP assays, total microbial and yeast and mold contents.

Main Results : Results demonstrated that pressure and time had significant interactive effects on redness (a*) and total microbial count ($p \leq 0.05$). Furthermore, pressure levels significantly influenced brightness (L*), redness (a*), yellowness (b*), pH, and antioxidant activity as measured by the Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) assay ($p \leq 0.05$). Mixed vegetables and fruit juice under pressure at 500 MPa for 5 min was increased in a* value (a* = -0.50, $p \leq 0.05$). However, pressure levels and time did not affect turbidity and total soluble solids content (TSS) of mixed vegetables and fruit juice samples ($p > 0.05$). Notably, increasing pressure levels correlated with decreased FRAP antioxidant activity ($p \leq 0.05$). FRAP contents of mixed vegetables and fruit juice under pressure at 500 MPa with duration between 3 and 9 min ranged from 7.45 to 7.93 µg TE/100 g sample. Pressure levels, times and

interaction between pressure levels and time (P*T) did not affect total phenolic contents and antioxidant activity by DPPH assays of mixed vegetables and fruit juice ($p>0.05$). Total phenolic contents and antioxidant activity by DPPH assays of mixed vegetables and fruit juice ranged from 35.94-41.21 µg GAE/100 g samples and 4.26-4.56 µg TE/100 g samples, respectively. Processing time significantly affected only brightness and pH ($p\leq0.05$). The pH values of mixed vegetables and fruit juice samples under HPP process at 300 MPa for 3-6 min were ranged between 3.83 and 3.84. When pressure level and time increased, total plate count decreased ($p\leq0.05$). Total microbial contents of mixed vegetables and fruit juices under pressure level more than 300 MPa for 3-9 min had ranged from 3.33 to 6.00 CFU/ml. While pressure, time, and their interaction did not significantly impact yeast and mold counts in the juice samples ($p>0.05$). The results exhibited that total yeast and molds of mixed vegetables and fruit juices under HPP were lower than mixed vegetables and fruit juices with untreated HPP. All treated samples exhibited microbial, yeast, and mold counts below the general criteria and limits set for high-pressure pasteurized acidic products ($pH \leq 4.64$). These findings align with the Thai Food and Drug Administration's (2019) guidelines, which recommend pressures of at least 400 MPa for 1-20 minutes for such products.

Conclusions : High-pressure processing of mixed vegetable and fruit juice at 400 MPa for 6 minutes emerges as a promising non-thermal treatment with potential for industrial application. This HPP condition exhibits a higher of total phenolic contents, and antioxidant activity by DPPH and FRAP assays in mixed vegetables and fruit juices from fresh-cut salad waste. Moreover, microbial, yeast, and mold counts align with the Food and Drug Administration's (2019) guidelines with an appropriate cost. This method not only ensures microbiological safety and quality but also presents an opportunity to add value to by-products from the fresh-cut produce industry or substandard vegetables, transforming them into nutritious health beverages.

Keywords : high-pressure technology ; non-thermal processing ; mixed vegetable and fruit juice ; physicochemical properties ; microbiology

***Corresponding author. E-mail** : nattavong@kku.ac.th

Introduction

ผักและผลไม้เป็นแหล่งของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและเส้นใยอาหาร ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อสุขภาพแล้วยังเป็นแหล่งอาหารสำหรับจุลินทรีย์โพรไบโอติกซ์ที่รักษาสมดุลในลำไส้ ผู้บริโภคในปัจจุบันได้หันมาบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพมากขึ้น เป็นผลให้อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ผักผลไม้สดและแปรรูปจึงมีการเติบโตมากขึ้น ก่อให้เกิดส่วนคัดทิ้งหรือส่วนเหลือใช้ประโยชน์ (food waste) เป็นจำนวนมาก ทั้งนี้ คุณภาพของส่วนคัดทิ้งหรือส่วนเหลือใช้บางส่วนจากอุตสาหกรรมผักผลไม้สดนั้น นอกจาก

คุณภาพด้านลักษณะปรากฏซึ่งอาจมีลักษณะที่ไม่น่ารับประทานแล้ว ยังคงคุณภาพที่ดีในด้านอื่น ๆ ที่ยังคงคุณค่าทางสารอาหารไม่แตกต่างกันจากส่วนที่นำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ จึงสามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่มได้ เช่น น้ำผลไม้ ผักดอง น้ำผักผลไม้หมัก น้ำส้มสายชู เป็นต้น (Sawaengpon, 2011) ผักสดตัดแต่งโดยเฉพาะอย่างยิ่งผักสลัด (lettuce; *Lactuca sativa*) เป็นผักที่ใช้ใบในการบริโภค แบ่งเป็น 3 กลุ่มใหญ่ คือ ผักกาดหอมห่อหัวคล้ายกะหล่ำปลี (head lettuce) ผักกาดหอมชนิดธรรมดาไม่ห่อหัว (leaf lettuce) และผักกาดหอมที่มีลำต้นยาว (stem lettuce) โดยกรีนโอ๊ค (*Lactuca sativa var.crispa L.*) เรดโอ๊ค (*Lactuca sativa var.crispa L.*) และคอส (*Lactuce sativa var.longifolla*) เป็นสายพันธุ์ผักสลัดที่นิยมบริโภคสดหรือแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ผักตัดแต่งพร้อมบริโภคในประเทศไทย ผักสลัดเหล่านี้มีกากใยอาหารมากช่วยให้ย่อยง่ายส่งผลในการช่วยล้างผนังลำไส้ บรรเทาอาการท้องผูก ลดการดูดซึมไขมัน มีวิตามินซี มีสารต้านอนุมูลอิสระ นอกจากนี้ยังมีธาตุเหล็กและโฟเลทสูง ป้องกันโรคโลหิตจาง ช่วยสร้างเม็ดเลือด บำรุงประสาท สายตา กล้ามเนื้อและผิวพรรณ การแปรรูปโดยความดันสูง (high pressure processing) เป็นนวัตกรรมการแปรรูปสมัยใหม่ที่ไม่ใช้ความร้อน ซึ่งนอกจากจะลดจำนวนจุลินทรีย์และยับยั้งเอนไซม์ได้แล้ว ยังสามารถรักษาคุณภาพด้านสี กลิ่นรส สารอาหาร และสารที่สลายตัวได้ง่ายด้วยความร้อน ปัจจุบันมีการใช้ความดันสูงที่ระดับ 400-600 MPa ในการแปรรูปเชิงการค้าของผลิตภัณฑ์อาหารหลากหลายได้เช่นเดียวกับการพาสเจอร์ไรซ์ เช่น น้ำผักผลไม้ เนื้อผลไม้บด (Xia *et al.,* 2023; Rios-Corripio *et al.,* 2024) เป็นต้น Rios-Corripio *et al.* (2024) พบว่า น้ำแบล็คเชอร์รี่ผ่านความดันสูงที่ระดับ 600 MPa นาน 5 นาที มีปริมาณสารต้านอิสระมากที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้ความดันสูงที่ระดับ 200 และ 400 MPa นาน 10 นาที และมากกว่าการใช้ความร้อนในระดับพาสเจอร์ไรซ์ Koo *et al.* (2023) รายงานว่า กิจกรรมของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (PPO) และเพอร์ออกซิเดส (POD) ในน้ำผักกวางตุ้ง (bok choy juice) ที่ผ่านความดันสูงลดลงเมื่อเวลาในการแปรรูปนานขึ้น โดยที่ความดัน 600 MPa นาน 20 นาทียังมีกิจกรรมของเอนไซม์ PPO และ POD คงเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 85 และ 69 ตามลำดับ แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระโดยรวม ปริมาณวิตามินซี แคโรทีนอยด์ ไอโซไทโอไซยาเนต และวิตามินเค อย่างไรก็ตามในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพยังต้องการงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ความดันสูงที่ส่งผลต่อคุณภาพในน้ำผักผสมน้ำผลไม้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาผลของระดับความดัน (300-500 MPa) และเวลา (3-9 นาที) ที่มีต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ของน้ำผักสลัด (กรีนโอ๊ค ผักเรดโอ๊ค และผักมินิคอส) ผสมน้ำผลไม้ (องุ่นแดง แอปเปิ้ลแดง และมะนาว) โดยข้อมูลจากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากผักโดยเฉพาะผักในกลุ่มผักสลัดหรือผักกินใบอื่น ๆ รวมถึงการใช้ประโยชน์จากส่วนของผักผลไม้ที่ไม่ได้มาตรฐาน-ตกเกรด หรือส่วนที่เหลือจากการตัดแต่ง โดยการแปรรูปแบบความดันสูงเพื่อคงรักษาสารที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายที่ไวต่อความร้อน

Methodology

1. การเตรียมน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้

นำส่วนที่เหลือทิ้งจากกระบวนการตัดแต่งผักสลัด ได้แก่ ผักกรีนโอ๊ค ผักเรดโอ๊ค และผักมินิคอส ของแปลงทดลองเกษตรยั่งยืน คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น มาใช้ในการผลิตน้ำผักสลัด ส่วนผลไม้ที่ใช้ผลิตน้ำผลไม้ ได้แก่ องุ่นแดง

สายพันธุ์ Crimson Seedless แอปเปิ้ลแดงสายพันธุ์ Red Delicious และมะนาวแป้น (*Citrus Aurantifolia (Christm.) Swingle*.) ได้มาจากตลาดขายส่งผลไม้ อ.เมือง จ.ขอนแก่น โดยนำส่วนของเหลือผักสลัดและผลไม้มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดผ่านระบบการกรอง ในส่วนของผักสลัดให้เด็ดใบผักและสลัดน้ำออก แล้วนำใบผักกรีนโอ๊ค ผักเรดโอ๊ค และผักมินิคอส ที่ล้างสะอาดแล้วไปสกัดเป็นน้ำผักสลัดโดยใช้ในอัตราส่วน 45:45:10 (โดยน้ำหนัก) ส่วนของผลไม้ทั้ง 3 ชนิด ให้นำมาสกัดเป็นน้ำผลไม้ โดยการสกัดด้วยเครื่องสกัดแบบเย็น (cool pressed processor, JE880 Kenwood, UK) จากนั้นนำน้ำผักสลัดและน้ำผลไม้ทั้ง 3 ชนิดมาผสมกันในอัตราส่วนน้ำผักสลัดร้อยละ 59.58 (โดยน้ำหนัก) น้ำองุ่นร้อยละ 23.57 (โดยน้ำหนัก) น้ำแอปเปิ้ลร้อยละ 14.85 (โดยน้ำหนัก) และน้ำมะนาวร้อยละ 2 (โดยน้ำหนัก) ทั้งนี้อัตราส่วนผสมของน้ำผักสลัดและน้ำผลไม้นี้ได้จากการศึกษาคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมจากการทดลองเบื้องต้นก่อนหน้านี้ จากนั้นบรรจุน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้ ปริมาณ 150 มิลลิลิตร ลงในขวดพลาสติก polyethylene terephthalate (PET) นำไปแปรรูปด้วยความดันสูง (HPP600MPa/50L, BaoTou KeFa High Presure Technology Co., Ltd, China) ที่ 300, 400, และ 500 MPa เป็นเวลา 3, 6 และ 9 นาที จากนั้นนำตัวอย่างหลังผ่านกระบวนการความดันสูงไปวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์

2. การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

2.1. ค่าสี วิเคราะห์สีโดยใช้เครื่อง colorimeter (Colorimeter, Ultra Scan XE, Hunter Lab, USA) รายงานผลในระบบ CIE โดยแสดงข้อมูลในค่า L* (ความสว่าง), a* (ค่าความเป็นสีแดง-สีเขียว) และ b* (ค่าความเป็นสีเหลือง-สีน้ำเงิน) (Fuangpaiboon *et al.*, 2024)

2.2. ค่าความขุ่น โดยใช้เครื่อง Spectrophotometer (UV-1800, Shimadzu, Japan) คำนวณค่าความขุ่นจากหลักการการดูดซับแสงของสารละลาย (สมการที่ 1) ตัวอย่างน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้เจือจาง 10 เท่า ใช้ความยาวคลื่นแสงที่ 560 นาโนเมตร โดยใช้สูตรคำนวณดังสมการ

$$A = 2 - \log \%T \quad (1)$$

เมื่อ A คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้

%T คือ ปริมาณพลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยสารละลาย หรือร้อยละความขุ่นของสารละลาย

3. การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

3.1. ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (TSS) วิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในตัวอย่างน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้ด้วยเครื่อง hand refractometer (Master-20P α , Atago, Japan)

3.2. ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของตัวอย่างน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้ ด้วยเครื่อง pH meter (Lab 850, SI Analytics, Germany)

3.3. ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (total phenolic content) วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในตัวอย่างน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้โดยใช้กรดแกลลิคเป็นสารมาตรฐาน ทำการทดลองโดยใช้ตัวอย่างน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้

ปริมาตร 500 ไมโครลิตร ใส่ลงในหลอดทดลอง และใช้สารละลาย Folin-ciocalteu's reagent (Loba Chemie, India) ร้อยละ 10 (ปริมาตรต่อปริมาตร) จำนวน 2.5 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลาย sodium carbonate ร้อยละ 7.5 (น้ำหนักต่อปริมาตร) จำนวน 2 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร คำนวณปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิค ปริมาณทั้งหมดของสารฟีนอลิกจะแสดงในหน่วยน้ำหนักไมโครกรัมเทียบเท่าของกรดแกลลิค (mg gallic acid equivalent, GAE) ต่อตัวอย่าง 100 กรัม (ดัดแปลงจาก Xia *et al.,* 2023)

3.4 กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH (2,2-diphenyl-1-picryhydrazyl) การเตรียมสารละลาย DPPH (DPPH working solution) โดยละลายสาร DPPH จำนวน 0.024 กรัมในเมทานอล 100 มิลลิลิตร จากนั้นเจือจางสารละลาย DPPH โดยนำสารละลาย DPPH จำนวน 10 มิลลิลิตร เติมเมทานอล จำนวน 45 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลาย DPPH เจือจางจำนวน 2,850 ไมโครลิตร ลงในตัวอย่างจำนวน 150 ไมโครลิตร นำไปตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 30 นาที แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร คำนวณกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH โดยเทียบกับสารมาตรฐานโทรล็อกซ์ รายงานผลเป็นไมโครกรัมเทียบเท่าสารโทรล็อกซ์ (ดัดแปลงจาก Rios-Corripio *et al.,* 2024)

3.5 กิจกรรมของการต้านอนุมูลอิระด้วยวิธี Ferric reducing antioxidant power (FRAP) เตรียมสารละลาย FRAP reagent โดยผสม 300 mM acetate buffer (pH 3.6), 10 mM TPTZ ในสารละลาย 40 mM HCl และสารละลาย 20 mM $FeCl_3$ ในอัตราส่วน 10:1:1 (โดยปริมาตร) เติม FRAP reagent จำนวน 2,850 ไมโครลิตร ลงในตัวอย่างจำนวน 150 ไมโครลิตร จากนั้นผสมให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้ในที่มืดนาน 30 นาที และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร คำนวณกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี FRAP รายงานในรูปค่า FRAP value โดยเทียบกับสารละลายมาตรฐานโทรล็อกซ์ รายงานผลเป็นไมโครกรัมเทียบเท่ากับสารโทรล็อกซ์ต่อตัวอย่าง 100 กรัม (ดัดแปลงจาก Sanguansil *et al.,* 2011)

4. การวิคราะห์คุณภาพทางจุลินทรีย์

4.1. ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (total plate count) ดัดแปลงจาก Phungamngoen *et al.* (2018) วิเคราะห์หาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้ (AOAC, 2000)

4.2. ปริมาณเชื้อยีสต์และรา (yeast and mold) วิเคราะห์หาปริมาณเชื้อยีสต์และราในตัวอย่างน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้ (AOAC, 2000)

5. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ 3x3 factorial experiment in Completely Randomized Design จำนวน 9 สิ่งทดลอง ทำการทดลอง 2 ซ้ำ และวิเคราะห์คุณภาพตัวอย่างละ 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยวิธี ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลด้วยวิธี Duncan's New Multiple's Rage Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป IBM SPSS version 28 (SPSS for Windows, SPSS Inc., Chicago, IL, USA)

Results

ค่าสีในค่าของความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ของน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้ที่ผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยความดันสูงที่ระดับความดัน (P) 300 400 และ 500 MPa ที่เวลา (t) 3 6 และ 9 นาที แสดงดัง Table 1

Table 1 Effect of pressures and times on physicals properties of high-pressure vegetables-fruits juice

Treatment		Color			Turbidity (%)^{ns}	pH ^{ns}	TSS (%Brix)^{ns}
Pressure (MPa)	Time (min)	L* ^{ns}	a* ^{Sig}	b* ^{ns}			
300	3	28.55 ± 0.07^{d}	-0.61 ± 0.07^{b}	4.30 ± 0.11^{d}	74.91 ± 1.77^{a}	3.84 ± 0.01^{a}	6.27 ± 0.06^{a}
	6	28.59 ± 0.02^{cd}	-0.58 ± 0.07^{b}	4.43 ± 0.06^{cd}	73.18 ± 5.21^{a}	3.83 ± 0.00^{a}	6.23 ± 0.06^{a}
	9	28.64 ± 0.04^{abc}	-0.64 ± 0.04^{b}	4.46 ± 0.13^{bc}	74.94 ± 1.15^{a}	3.81 ± 0.02^{b}	6.23 ± 0.06^{a}
400	3	28.61 ± 0.02^{bcd}	-0.61 ± 0.03^{b}	4.52 ± 0.01^{abc}	72.27 ± 1.64^{a}	3.80 ± 0.01^{b}	6.23 ± 0.06^{a}
	6	28.68 ± 0.04^{ab}	-0.63 ± 0.07^{b}	4.60 ± 0.06^{ab}	74.86 ± 1.18^{a}	3.80 ± 0.01^{b}	6.23 ±0.06^{a}
	9	28.69 ± 0.05^{a}	-0.63 ± 0.03^{b}	4.60 ± 0.07^{ab}	72.97 ± 1.32^{a}	3.80 ± 0.01^{b}	6.17 ± 0.06^{a}
500	3	28.70 ± 0.07^{a}	-0.62 ± 0.02^{b}	4.63 ± 0.09^{a}	73.85 ± 0.93^{a}	3.80 ± 0.01^{b}	6.20 ± 0.00^{a}
	6	28.71 ± 0.03^{a}	-0.58 ± 0.02^{b}	4.67 ± 0.05^{a}	75.00 ± 2.55^{a}	3.80 ± 0.01^{b}	6.20 ± 0.00^{a}
	9	28.70 ± 0.02^{a}	-0.50 ± 0.03^{a}	7.61 ± 0.08^{ab}	72.95 ± 0.65^{a}	3.80 ± 0.01^{b}	6.17 ± 0.06^{a}

Note : Data are expressed as mean ± SD ; The different letters within the same column indicate significant differences in treatments ($p \leq 0.05$) ; ns means there are no interaction of pressure*time ; Sig means there are interaction of pressure*time.

พบว่า มีอิทธิพลร่วมของความดันและเวลา (P*t) ต่อค่าความเป็นสีแดง (a*) อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ขณะที่ความดันมีอิทธิพลต่อค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) และค่าพีเอช ($p \leq 0.05$) (ไม่ได้แสดงในตาราง) นอกจากนี้ระยะเวลามีอิทธิพลต่อค่า L* และค่า pH ในตัวอย่างน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้ ($p \leq 0.05$) (ไม่ได้แสดงในตาราง) อย่างไรก็ตาม ความดัน เวลา และอิทธิพลร่วมระหว่างความดันและเวลาไม่มีอิทธิพลต่อค่าความขุ่นและค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ ($p>0.05$)

น้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้ที่ผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยความดันสูงที่ระดับความดัน 500 MPa นาน 3-9 นาที มีค่า L* และ a* สูงกว่า แต่มีค่าพีเอชที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ความดันสูงที่ระดับอื่น ๆ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่การใช้ความดันสูง

ที่ระดับ 300 MPa นาน 3 และ 6 นาที ส่งผลให้น้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้มีค่า L*และ b* น้อยที่สุดแต่มีค่าพีเอชสูงที่สุด ($p \leq 0.05$) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และค่าความขุ่นของน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้ไม่แตกต่างกันในทุกระดับความดันสูงและระยะเวลาในการแปรรูป ($p > 0.05$)

Table 2 Effect of pressures and times on total phenolic compound and antioxidant activity of high-pressure vegetables-fruits juice

Treatment		TPC^{ns}	DPPH^{ns}	FRAP
Pressure (MPa)	Time (min)	(µg GAE/100 g samples)	(µg TE/100 g samples)	(µg TE/100 g samples)
300	3	41.21 ± 1.91^{a}	4.44 ± 0.29^{a}	10.30 ± 1.89^{a}
	6	39.33 ± 1.57^{a}	4.50 ± 0.20^{a}	9.26 ± 0.26^{abc}
	9	40.40 ± 2.85^{a}	4.46 ± 0.17^{a}	9.55 ± 0.64^{ab}
400	3	38.19 ± 4.24^{a}	4.26 ± 0.24^{a}	7.70 ± 0.08^{d}
	6	40.29 ± 3.18^{a}	4.50 ± 0.04^{a}	8.49 ± 0.15^{bcd}
	9	38.06 ± 4.78^{a}	4.39 ± 0.14^{a}	8.73 ± 0.45^{bcd}
500	3	38.06 ± 2.62^{a}	4.42 ± 0.15^{a}	7.45 ± 0.46^{d}
	6	35.94 ± 2.26^{a}	4.38 ± 0.07^{a}	7.48 ± 0.29^{d}
	9	36.36 ± 4.24^{a}	4.56 ± 0.19^{a}	7.93 ± 0.39^{cd}

Note: Data are expressed as mean ± SD. The different letters within the same column indicate significant differences in treatments ($p \leq 0.05$). ns means there are no interactions of pressure*time.

ผลของการใช้ความดันสูงและระยะเวลาที่แตกต่างกันต่อปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH และ FRAP ในน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้แสดงดัง Table 2 พบว่า ระดับความดันมีอิทธิพลต่อกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP ($p \leq 0.05$) และไม่พบอิทธิพลร่วมระหว่างระดับความดันสูงและระยะเวลาต่อปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH และ FRAP ($p > 0.05$) ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH มีค่าไม่แตกต่างกันในทุกระดับความดันสูงและระยะเวลาในตัวอย่างน้ำผักสลัดรวมผสมน้ำผลไม้ ($p > 0.05$) แต่พบว่าเมื่อระดับความดันสูงที่มากขึ้นส่งผลให้ค่า FRAP ลดลง ($p \leq 0.05$) โดยการใช้ความดันสูงที่ 500 MPa ส่งผลให้ค่า FRAP ลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับความดันที่ 300 MPa ($p \leq 0.05$) การใช้ความดันสูงที่ 300 MPa นาน 3 นาที ส่งผลให้น้ำผักสลัดรวมผสมน้ำผลไม้มีค่า FRAP มากที่สุด (10.30 µg TE/100 g samples) ($p \leq 0.05$)

Table 3 Effect of pressures and times on microbiological properties of high-pressure vegetables-fruits juice

Treatment		Total plate count (CFU/ml) ^{Sig}	Yeast and molds^{ns}
Pressure (MPa)	Time(min)		(CFU/ml)
300	3	6.67 ± 1.53^{ab}	2.67 ± 2.08^{ab}
	6	3.67 ± 0.58^{b}	4.33 ± 1.15^{b}
	9	8.33 ± 3.21^{a}	3.67 ± 0.58^{a}
400	3	3.33 ± 0.58^{b}	5.67 ± 2.08^{b}
	6	5.00 ± 1.73^{b}	6.00 ± 7.81^{b}
	9	4.33 ± 1.15^{b}	3.33 ± 2.51^{b}
500	3	4.67 ± 1.15^{b}	4.67 ± 1.15^{b}
	6	6.00 ± 1.00^{ab}	6.67 ± 4.16^{Ab}
	9	4.67 ± 2.52^{b}	3.33 ± 3.21^{b}

Note: Data are expressed as mean ± SD. The different letters within the same column indicate significant differences in treatments ($p \leq 0.05$). Sig means there are interactions of pressure*time.

ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และราในน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้ที่ผ่านกระบวนการความดันสูงระดับ 300, 400 และ 500 MPa นาน 3, 6 และ 9 นาที แสดงดัง Table 3 พบว่า มีอิทธิพลร่วมของความดันและเวลาต่อการลดลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และความดันมีอิทธิพลต่อต่อปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ($p \leq 0.05$) การใช้ความดันสูงที่ระดับมากกว่า 400 MPa นาน 3 ถึง 9 นาที ในน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้ พบว่า มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดน้อยกว่า 6 CFU/ml ในขณะที่ตัวอย่างที่ไม่ผ่านการใช้ความดันสูง (ชุดควบคุม) มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด 26 CFU/ml (ไม่ได้แสดงในตาราง) ผลของกระบวนการความดันสูงต่อปริมาณยีสต์และรา พบว่า ระดับความดัน ระยะเวลา และอิทธิพลร่วมระหว่างระดับความดันและเวลานั้นไม่มีอิทธิพลต่อปริมาณเชื้อยีสต์และราในตัวอย่างน้ำผักสลัดผสมผลไม้ ($p > 0.05$) แต่ปริมาณยีสต์และราน้อยกว่า 6.67 CFU/ml ในขณะที่ตัวอย่างที่ไม่ผ่านการใช้ความดันสูง (ชุดควบคุม) มีเชื้อยีสต์-รา 55.33 CFU/ml (ไม่ได้แสดงในตาราง)

Discussion

น้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้ก่อนและหลังที่ผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยความดันสูงมีสีเขียว (มีค่า a* เป็นลบ) ผลของความดันและเวลามีผลต่อค่าความเป็นสีเขียว (a*) ($p \leq 0.05$; Table 1) ในขณะที่ไม่มีผลต่อค่าความสว่าง (L*) และความเป็นสีเหลือง (b*) ($p > 0.05$) โดยการใช้ความดันสูงที่ 500 MPa นาน 9 นาที มีผลให้ค่าความเป็นสีเขียวลดลงหรือค่าความเป็น

สีแดงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการใช้ที่ระดับความดันและเวลาอื่น ๆ (ค่า a* ติดลบน้อยลง Δa^* อยู่ในช่วง +0.08 ถึง +0.14, ไม่แสดงข้อมูลในตาราง) โดยทั่วไปการแปรรูปโดยความดันสูงจะไม่มีผลหรือมีผลน้อยมากต่อสีของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากพันธะโควาเลนซ์ของโครงสร้างองค์ประกอบที่ให้สีในผักผลไม้จะมีความคงทนต่อความดันสูง (Zou *et al.,* 2024) นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของค่าสีสามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลทั้งแบบเกี่ยวข้องกับเอนไซม์และไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ รวมไปถึงกระบวนสลายตัว (degradation) หรือพอลิเมอร์ไรซ์เซชัน (polymerization) ของรงควัตถุ (Szczepan´ska *et al.,* 2021; Zou *et al.,* 2024) การเปลี่ยนแปลงสีของน้ำผักผสมน้ำผลไม้สกัดเย็นที่เกิดขึ้นนี้เนื่องจากเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase; PPO) และเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส (peroxidase; POD) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่พบมากในผักและผลไม้ เช่น แอปเปิ้ลและองุ่นแดง ซึ่งมีบทบาทต่อกลไกการเกิดสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอลทำให้เปลือกผลเปลี่ยนเป็นสารสีน้ำตาลคล้ำ (Jiang & Li, 2001; Zou *et al.,* 2024) ซึ่งยังคงพบกิจกรรมของเอนไซม์ดังกล่าวบางส่วนในตัวอย่างหลังผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยความดันสูง ทั้งนี้ Stinco *et al.* (2019) ศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปด้วยความดันสูงต่อกิจกรรมของเอนไซม์ PPO และ POD ในน้ำแครอทแบบขุ่น พบว่าหลังผ่านความดันสูงที่ระดับความดัน 300, 450, 600 MPa นาน 5 นาที ไม่สามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ทั้งสองชนิดได้ อาจเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงสีได้ ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับ Rios-Corripio *et al.,* (2024) พบว่า เครื่องดื่มแบล็คเชอร์รี่หลังจากผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยความดันสูง ($p \leq 0.05$) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสี L*, a* และ b* นอกจากนี้ความดันสูงอาจทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าสีเขียว (a*) ลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการออกซิเดชันของเม็ดสีคลอโรฟิลล์ (Oey *et al.,* 2008)

การใช้ความดันสูงที่ 400 และ 500 MPa มีผลต่อการลดลงของค่าความเป็นกรดด่างเมื่อเทียบกับน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้ที่ใช้ความดันที่ 300 MPa ($p \leq 0.05$) การใช้เวลานาน 3-9 นาที ภายใต้ความดันที่ 300-500 MPa มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดด่างของน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้ ทั้งนี้ Tangwongchai *et al*., (2000) รายงานว่า ความดันสูงที่ 300-400 MPa ยังไม่สามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์พอลิกาเลคทูโรเนส (PG) ได้ ซึ่งจะก่อให้เกิดกรดกาแลคทูโรนิค จึงเป็นเหตุให้ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ลดลง แต่อย่างไรก็ตามความดันที่ 500 MPa สามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์พอลิกาเลคทู-โรเนสได้จึงเป็นผลให้ pH ของน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้ที่ผ่านความดันที่ 400 และ 500 MPa ไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) สอดคล้องกับ Jayachandran *et al.,* (2015) ที่รายงานว่า ค่า pH ของน้ำลิ้นจี่มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อระดับความดันเพิ่มขึ้น การใช้ความดันสูงจะเสริมการแตกตัวของน้ำและกรดอ่อนในอาหาร ซึ่งส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของไอออน H^+ ในอาหาร กระบวนการความดันสูงสามารถทำให้ผนังเซลล์เกิดการแตก ส่งเสริมให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือกระจายตัวของสารประกอบภายในเซลล์รวมไปถึงการแตกของพันธะบางส่วนในสารประกอบ (Zou *et al.,* 2024) การแตกตัวเป็นประจุ (ionization) เกิดได้ภายใต้แรงดันสูง (Heremans, 1995) อาจส่งผลให้เกิดการลดลงของความเป็นกรด-ด่างเล็กน้อยแม้จะลดความดันแล้วก็ตาม

การใช้ความดันสูงในการแปรรูปไม่มีผลต่อความขุ่นของตัวอย่างและปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ TSS (°Brix) ของน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้ ($p>0.05$) โดยปริมาณสารประกอบที่ละลายน้ำได้ส่วนใหญ่จะทนต่อความดัน เนื่องจากประกอบด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งกระบวนการใช้ความดันสูงไม่ทำลายหรือมีผลเพียงเล็กน้อยต่อพันธะโควาเลนต์ (Jayachandran *et al.,* 2015; Xia *et al.,* 2023; Li & Padilla-Zakour, 2024; Rios-Corripio *et al.,* 2024) เอนไซม์ที่มีผลต่อความขุ่นของน้ำผลไม้ เช่น เอนไซม์เพคตินเมทธิลเอสเทอเลส (PME) จะทนต่อความดันสูง Tangwongchai *et al*. (2000) พบว่า เอนไซม์ PME ในผลมะเขือเทศทนความดัน 200-600 MPa นาน 20 นาทีได้

ผลของปัจจัยด้านระดับความดัน ระยะเวลา และอิทธิพลร่วมระหว่างระดับความดันและเวลานั้นไม่มีอิทธิพลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH (Table 2; $p>0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากความดันสูงจะมีผลในการสลายพันธะเคมีที่มีระยะห่างระหว่างพันธะมาก เช่น พันธะนอนโควาเลนซ์ (non-covalent bonds) จะถูกทำลายได้ง่ายภายใต้ความดันสูง ในขณะที่พันธะโควาเลนซ์ค่อนข้างทนต่อความดันสูง ซึ่งสารประกอบจำพวกสารต้านอนุมูลอิสระ วิตามินและกลิ่นรส ซึ่งประกอบด้วยพันธะโควาเลนซ์จึงไม่เปลี่ยนแปลงภายใต้ความดัน (Tangwongchai & Attapolpaisarn, 2010) โดยผลการทดลองที่ได้สอดคล้องการการรายงานของ Li & Padilla-Zakour (2024) พบว่า กิจกรรมของสารต้านอนุมูลอิสระในน้ำองุ่นคองคอร์ดที่ผ่านกระบวนการความดันสูงมีค่าไม่แตกต่างจากน้ำองุ่นคองคอร์ดสด (ชุดควบคุม) Xia *et al.* (2023) และ Rios-Corripio *et al.* (2024) พบว่า ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดในน้ำผลไม้ที่ผ่านการแปรรูปโดยใช้ความดันสูงมีค่าไม่แตกต่างจากน้ำผลไม้สด แต่มีค่าสูงกว่าน้ำผลไม้ที่ผ่านการแปรรูปโดยใช้ความร้อน Rios-Corripio *et al.* (2024) รายงานว่า น้ำแบล็คเชอร์รี่สดหลังผ่านกระบวนการความดันสูงที่ 600 MPa นาน 5 นาที มีปริมาณฟีนอลิกสูงที่สุดทั้งในวันแรกและวันที่ 49 ของการเก็บรักษา นอกจากนี้ Table 2 แสดงให้เห็นว่า เมื่อระดับความดันสูงมากกว่า 300 MPa ส่งผลให้ค่า FRAP ลดลง ($p\leq0.05$) เนื่องจากความดันสูงจะเร่งการแตกตัวเป็นประจุและปฏิกิริยาออกซิเดชั่นที่ก่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเลคตรอน จึงอาจเป็นเหตุให้สารประกอบฟีนอลิกหรือสารต้านอนุมูลอิสระที่มีคุณสมบัติเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นสารรีดิวซ์หรือสารต้านอนุมูลอิสระอื่นในการส่งผ่านอิเลคตรอนมีปริมาณลดลงได้ ($p>0.05$) สอดคล้องกับ Yuan *et al.* (2018) ที่รายงานว่า การแปรรูป aronia berry puree ด้วยความดันสูงมีผลให้ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่วิเคราะห์ด้วยวิธี FRAP มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มระดับความดันจาก 400 MPa เป็น 600 MPa โดยกิจกรรมสารต้านอนุมูลอิสระในน้ำผลไม้จะลดลงเมื่อผ่านความดันที่ระดับเริ่มต้นจาก 100 ถึง 800 MPa แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงและระยะเวลานานจะส่งผลให้กิจกรรมสารต้านอนุมูลอิสระลดลงมากกว่าการใช้ความดันสูง (Jayachandran *et al.,* 2015; Rios-Corripio *et al.,* 2024)

จากการศึกษาปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์และรา พบว่า ปัจจัยร่วมของระดับความดันและเวลามีผลต่อปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ($p\leq0.05$) ในขณะที่ปัจจัยร่วมไม่มีผลต่อปริมาณยีสต์รา ($p>0.05$) โดยการใช้ความดันที่ระดับสูงและเวลาที่นานขึ้นส่งผลต่อการลดลงของปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ($p\leq0.05$) น้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้ที่ผ่านกระบวนการแปรรูปโดยความดันสูงที่ระดับ 300-500 MPa นาน 3-9 นาที มีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดอยู่ในช่วง 3.33-8.33 CFU/ml ในขณะ

ที่น้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้ก่อนผ่านกระบวนการแปรรูปโดยความดันสูงมีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด 26 CFU/ml นอกจากนี้ระดับความดันมีอิทธิพลต่อปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ($p \leq 0.05$) โดยความดันที่ระดับ 400 MPa พบว่า มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดเหลืออยู่น้อยที่สุด 3.33 - 4.33 CFU/ml และพบว่าน้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้ผ่านกระบวนการแปรรูปโดยความดันสูงมีปริมาณยีสต์และราในช่วง 2.67-6.67 CFU/ml ในขณะที่น้ำผักสลัดผสมน้ำผลไม้เริ่มต้นมีปริมาณยีสต์และราเท่ากับ 55.33 CFU/ml สอดคล้องกับ Li & Padilla-Zakour (2024) พบว่า ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดในน้ำองุ่นคองคอร์ดลดลงเหลือ 1.9 logCFU/ml หลังจากผ่านกระบวนการความดันสูง นอกจากนี้ การใช้ความดันสูงที่ระดับ 600 MPa นาน 5 นาที ในน้ำแบล็คเชอร์รี่และน้ำแบล็คเชอร์รี่หมักและการใช้ความดันสูงที่ระดับ 400 MPa นาน 10 นาที สามารถลดแบคทีเรียที่ชอบอุณหภูมิปานกลางได้ประมาณ 3 logarithmic cycle เมื่อเทียบกับน้ำแบล็คเชอร์รี่สด และไม่พบปริมาณยีสต์และราในตัวอย่างน้ำแบล็คเชอร์รี่หมักที่ผ่านความดันสูงที่ระดับ 200 และ 400 MPa นาน 10 นาที และ 600 MPa นาน 5 นาที และน้ำแบล็คเชอร์รี่หมักที่ผ่านความดันสูงที่ระดับ 600 MPa นาน 5 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ความดันสูงสามารถกำจัดยีสต์และราได้อย่างสมบูรณ์ (Rios-Corripio *et al.*, 2024) การใช้ความดันสูงที่ระดับ 400 MPa นาน 2 นาที สามารถลดเชื้อก่อโรค (*Escherichia coli O157:H7, Salmonella enterica* และ *Listeria monocytogenes*) ได้ 5 logarithmic cycle (Petrus *et al.*, 2020) นอกจากนี้ การใช้ความดันสูงที่ระดับสูงกว่า 300 MPa สามารถทำให้เซลล์เมมเบรนของจุลินทรีย์แตกและทำให้เอนไซม์และโครงสร้างโปรตีนในเซลล์จุลินทรีย์เสียสภาพจนสามารถรายงานว่าไม่พบปริมาณจุลินทรีย์ได้ (Xia *et al.*, 2023) การใช้ความดันที่ระดับสูงมากจะทำให้ยับยั้งการเจริญเติบโตของสปอร์ของแบคทีเรียและทำลายเซลล์ที่กำลังจะขยายตัว ความดันสูงจะทำให้แวคคิวโอล (vacuoles) ภายในเซลล์แตก ทำลายผนังเซลล์และเซลล์เมมเบรนให้ฉีกขาดเป็นผลให้ปริมาณจุลินทรีย์หลังจากเข้าสู่กระบวนการแปรรูปด้วยแรงดันสูงลดลง ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดที่เหลืออยู่ในตัวอย่าง สอดคล้องมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนน้ำผลไม้รวมเข้มข้น กำหนดให้จุลินทรีย์ทั้งหมดต้องไม่เกิน $1x10^4$ โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร (Thai Community Product Standard, 2014) ดังนั้นกระบวนการความดันสูงเป็นไปตามมาตรฐานอาหารและยาของน้ำผลไม้ที่สามารถลดเชื้อก่อโรคได้ 5 logarithmic cycle

Conclusions

ผักสลัดเหลือทิ้งจากการตัดแต่งทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ กรีนโอ๊ค เรดโอ๊ค และมินิคอส มีศักยภาพในการนำมาเพิ่มมูลค่าในการผลิตน้ำผักสลัดสกัดในอัตราส่วน 45:45:10 (โดยน้ำหนัก) และนำมาผสมกับน้ำผลไม้ 3 ชนิด ได้แก่ องุ่นแดง แอปเปิ้ลแดง และมะนาว ที่ผ่านกระบวนการสกัดแบบเย็น ในอัตราส่วนน้ำผักสลัดร้อยละ 59.58 (โดยน้ำหนัก) น้ำองุ่นร้อยละ 23.57 (โดยน้ำหนัก) น้ำแอปเปิ้ลร้อยละ 14.85 (โดยน้ำหนัก) และน้ำมะนาวร้อยละ 2 (โดยน้ำหนัก) เพื่อปรับปรุงกลิ่น-รส จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการแปรรูปโดยใช้ความดันสูงที่ระดับ 400 MPa นาน 6 นาที สามารถลดปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และราให้อยู่ในมาตรฐานน้ำผลไม้ได้ แต่ยังคงรักษากิจกรรมสารต้านอนุมูลอิสระ FRAP เท่ากับ 8.49 µg TE/100 g และมีค่าความสว่างมากกว่าการใช้ความดันที่ระดับ 300 MPa โดยยังคงรักษาคุณภาพในด้านต่าง ๆ ได้ไม่แตกต่างกับการใช้ความดันที่ระดับสูง จึงสามารถนำไปผลิตเชิงอุตสาหกรรมน้ำผักสกัดผสมผลไม้เพื่อสุขภาพ แต่ยังคงมีข้อจำกัด เช่น หากมีการ

เปลี่ยนชนิดหรือองค์ประกอบของน้ำผักผสมน้ำผลไม้อาจต้องศึกษาเพื่อยืนยันสภาวะการใช้ความดันสูงที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์นั้น ๆ

Acknowledgments

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณโครงการจาก “ฝ่ายวิจัยและบัณฑิตศึกษา” มหาวิทยาลัยขอนแก่น และการสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ จากสาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น

References

AOAC. (2000). Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists, (17th ed.). Washington D.C.

Food and Drug Administration. (2019). General criteria and product scope for using the high pressure pasteurization process (High-Pressure Processing (HPP)). (pp. 1-6). (in Thai)

Fuangpaiboon, N., Srijesdaruk, V., & Kijroongrojana, K. (2024). The effects of mixed proteins on the physical and rheological properties and the sensory qualities of a newly formulated plant-based soup for elderly consumers. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology, 29*(1), 1-10.

Heremans, K. (1995). High-pressure effect on biomolecules. In D.A. Ledward, D.E. Johnston, R.G. Earnshaw, & A.P.M. Hastings. (Eds.), *High Pressure Processing of Food*s. (pp. 81-97). Nottingham University Press: Nottingham.

Jayachandran, L. E., Chakraborty, S., & Rao, P. R. (2015). Effect of high pressure processing on physicochemical properties and bioactive compounds in litchi based mixed fruit beverage. *Innovative Food Science and Emerging Technologies, 28,* 1-9.

Jiang, Y., & Li, Y. (2001). Effects of chitosan coating on postharvest life and quality of longan fruit. *Food Chemistry, 73,* 139-143.

Koo, A., Chew, D.X., Ghate, V., & Zhou, W. (2023). Residual polyphenol oxidase and peroxidase activities in high pressure processed bok choy (Brassica rapa subsp. chinensis) juice did not accelerate nutrient degradation during storage. *Innovative Food Science and Emerging Technologies, 84,* 1-9.

Li, Y., & Padilla-Zakour, O. I. (2024). Evaluation of pulsed electric field and high-pressure processing on the overall quality of refrigerated Concord grape juice. *LWT - Food Science and Technology, 198,* 116002.

Oey, I., Lille, M., Loey, A.V., & Hendrickx, M. (2008). Effect of highpressure processing on colour, texture and flavour of fruit- and vegetable-based food products: a review. *Trends in Food Science & Technology, 19,* 320-328.

Petrus, R., Churey, J., & Worobo, R. (2020). Searching for high pressure processing parameters for *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica* and *Listeria monocytogenes* reduction in Concord grape juice. *British Food Journal, 122*(1), 170-180.

Phungamngoen, C., Eadmusik, S., & Suwan T. (2018). Influence of sterilize condition and storage time of canned bamboo shoot in Yanang juice. *Italian Journal of Food Science, 30*(5), 24-29.

Rios-Corripio, G., Welti-Chanes, J., Rodríguez-Martínez, V., & Guerrero-Beltr´an, J. ´A. (2024). High hydrostatic pressure processing of fresh juice and a fermented beverage of black cherry (*Prunus serotina*). *Journal of Agriculture and Food Research, 15,* 100937.

Sanguansil, S., Boonprakob, U., & Thaipong, K. (2011). Antioxidant Activity, Phenolics, Flavonoids and Fruit Quality of Dessert-type Guava. *Agricultural Science Journal, 42* (Suppl), 579-582.

Sawaengpon, S. (2011). *The relationship between quality changes and respiration rate of fresh-cut vegetable salad stored under modified atmosphere package*. M.Sc. Thesis. Suranaree University of Technology.

Stinco, C. M., Szczepańska, J., Marszałek, K., Pinto, C. A., Inácio, R. S., Mapelli-Brahm, P., Barba, F. J., Lorenzo, J., M., Saraiva, J. A., & Meléndez-Martínez, A. J. (2019). Effect of high-pressure processing on carotenoids profile, colour, microbial and enzymatic stability of cloudy carrot juice. *Food Chemistry, 299,* 125112.

Szczepa´nska, J., Skąpska, S., Lorenzo, J. M., & Marszałek, K. (2021). The influence of static and multi-pulsed pressure processing on the enzymatic and physico-chemical quality, and antioxidant potential of carrot juice during refrigerated storage. *Food and Bioprocess Technology, 14,* 52–64.

Tangwongchai, R., Ledward, D.A., & Ames, J.M. (2000). Effect of high pressure treatment on the texture of cherry tomatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *48*(5), 1434-1441.

Tangwongchai, R., & Attapolpaisarn, C. (2010). Effect of high pressure and temperature treatment on PME activity in cloudy fruit juice. *Food Journal, 40*(2), 42-46. (in Thai)

Thai Community Product Standard. (2014). TCPS 1307/2014 Mix Fruits Syrup. Thai Industrial Standards Institute. (in Thai)

Xia, Q., Liu, C., Cao, Y., Zhao, Y., Lu, S., Wu, D., Aniya, & Guan, R. (2023). Improving quality of sea buckthorn juice by high-pressure processing. *LWT - Food Science and Technology, 185,* 115149.

Yuan, B., Danao, M.C., Lu, M., Weier, S.A., & Stratton, J.S. (2018). High pressure processing (HPP) of aronia berry puree: Pilot scale processing. *Innovative Food Science and Emerging Technologies, 47,* 241-248.

Zou, W., Niu, H., Yi, J., & Zhou, L. (2024). Passion fruit juicing with or without seeds treated by high-pressure processing and thermal pasteurization: Effects on the storage stability of enzymes and quality properties. *Innovative Food Science and Emerging Technologies, 91,* 103554.